есть исчерпывается запас прочности при давлении и срезывающем усилии, форма разрушения – обвал кровли.

Механизм взаимодействия «штанги - конструкции» в штанговом креплении конструкции с трещинами разделяется на два этапа:

1) на начальном этапе заключается под действием силы поддерживания штанги или при условии возникновения небольших деформаций и перемещений, образуется круглый конус давления, центром которого является штанга. Эти круглые конусы давления образуют балку давления, т.е. составную балку;
2) на более позднем этапе возникает шарнирный свод при развитии большой деформации. Когда составная балка начинает отходить от слоя и опускаться, появляется значительная деформация, посередине и в точке опоры появляются и раскрываются трещины, таким образом, возникает распор. Другие трещины между двумя точками опоры не раскрываются. Под действием горизонтальной поперечной силы вдоль трещин возникает сила трения, тогда штанги останавливают поворот некоторых частей конструкции и образуется составной шарнирный свод.

1.Ли Чинкей. Доклад обследования штангового крепления штрека в шахте Ваняне, Хебэйский технический университет строительства и архитектуры, 12, 1997.

2.Ян Цзяньхуй, Ли Чинкей, Оптимальные параметры структуры штангового крепления // Новое развитие техники строительства шахты и штрека. – Изд-во «Китайский горный университет», 1997.

3.Ли Чинкей. Доклад исследования механизма штангового крепления угольного штрека в различных условиях. – 11, 1996.

Получено 18.05.2002

УДК 624.012.45 : 539.376

С.А.СЛОБОДЯНЮК, канд. техн. наук
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г.Днепропетровск

НАПРЯЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

Приводится вывод формул нормальных и касательных напряжений стержневого пространственного железобетонного элемента. Формулы получены для бетона и арматуры стержня с учетом усадки и ползучести бетона. Показан переход от расчетов текущих значений напряжений к расчетным формулам СНиП, что может использоваться при проектировании и реконструкции сооружений городского хозяйства.

Вывод формул для напряжений в бетоне и арматуре стержневого пространственного элемента будем выполнять по аналогичным допущениям и методике, что и при выводе формул плоского элемента [1].

Здесь подробный вывод формул опустим, а только остановимся на отличительных особенностях и конечных результатах.

Считается справедливой обобщенная для железобетонных пространственных стержней гипотеза плоских сечений, которая в любой момент времени выражается соотношением:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_в &= \varepsilon + \chi_z y + \chi_y z; \\ \varepsilon_e &= \varepsilon + \chi_z y_e + \chi_y z_e, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где $\varepsilon \equiv \varepsilon(x,t)$ – продольная деформация оси элемента; $\chi_z \equiv \chi_z(x,t) \approx -\dfrac{d^2 y}{dx^2}$; $\chi_y \equiv \chi_y(x,t) \approx -\dfrac{d^2 z}{dx^2}$ – кривизны изгиба элемента относительно осей z и y соответственно. Данные параметры полностью определяют положение плоскости поперечного сечения стержня во времени.

Внутренние усилия распределяются между бетоном и арматурой:

$$\left.\begin{aligned} N &= \int_{A_в} \sigma_в dA_в + \sum_{e=1}^{s} \sigma_e A_e; \\ M_z &= \int_{A_в} \sigma_в z dA_в + \sum_{e=1}^{s} \sigma_e A_e z_e; \\ M_y &= \int_{A_в} \sigma_в y dA_в + \sum_{e=1}^{s} \sigma_e A_e y_e. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

С помощью (1) и (2) получим следующую разрешающую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} E_o A\left[Б_\mu \varepsilon + e_{sz} W \chi_z + e_{sy} W \chi_y\right] &= \Lambda N + V N_u; \\ E_o I_z\left[\eta_z W \varepsilon + Б_{\lambda z}\chi_z + \lambda_{zy} W \chi_y\right] &= \Lambda M_z + V M_{uz}; \\ E_o I_y\left[\eta_y W \varepsilon + \lambda_{yz} W \chi_z + Б_{\lambda y} \chi_y\right] &= \Lambda M_y + V M_{uy}, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

где N_u, M_{uz}, M_{uy} – условные продольная сила и изгибающие моменты от деформации усадки (набухания) бетона:

$$N_u = E_0 A_в \varepsilon_u; \quad M_{uz} = E_0 S_{вz} \varepsilon_u; \quad M_{uy} = E_0 S_{вy} \varepsilon_u \qquad (4)$$

и введены следующие геометрические характеристики сечения:

$$\mu=\frac{A_s}{A};\quad e_{sz}=\frac{S_{sz}}{A};\quad e_{sy}=\frac{S_{sy}}{A};\quad \eta_z=\frac{S_{sz}}{I_z};\quad \eta_y=\frac{S_{sy}}{I_y};$$

$$\lambda_{zy}=\frac{J_{s,zy}}{I_z};\quad \lambda_z=\frac{J_{sz}}{I_z};\quad \lambda_y=\frac{J_{sy}}{I_y};\quad \lambda_{yz}=\frac{J_{s,yz}}{I_y};$$

$$A=A_в+A_s;\qquad S_z=S_{вz}+S_{sz}=0;\qquad S_y=S_{вy}+S_{sy}=0;$$

$$I_z=J_{вz}+J_{sz};\quad I_y=J_{вy}+J_{sy};\quad I_{zy}=I_{yz}=J_{в,zy}+J_{s,zy}=0. \tag{5}$$

Здесь также введены следующие приведенные характеристики площади сечения:

- осевые статические моменты

$$S_{вz}=\int\limits_{A_в} y\,dA_в;\; S_{sz}=\sum_{e=1}^{s}\frac{E_e}{E_0}A_e\,y_e;\; S_{вy}=\int\limits_{A_в} z\,dA_в;$$

$$S_{sy}=\sum_{e=1}^{s}\frac{E_e}{E_0}A_e\,z_e;$$

- осевые моменты инерции

$$J_{вz}=\int\limits_{A_в} y^2 dA_в;\quad J_{sz}=\sum_{e=1}^{s}\frac{E_e}{E_0}A_e y_e^2;\quad J_{вy}=\int\limits_{A_в} z^2 dA_в;$$

$$J_{sy}=\sum_{e=1}^{s}\frac{E_e}{E_0}A_e\,z_e^2;$$

- центробежные моменты инерции

$$J_{в,zy}=J_{в,yz}=\int\limits_{A_в} zy\,dA_в;\quad J_{s,zy}=J_{s,yz}=\sum_{e=1}^{s}\frac{E_e}{E_0}A_e z_e y_e. \tag{6}$$

Операторы влияния ползучести равны:

$$\left.\begin{aligned}&Б_\mu=(1-\mu)V+\mu\Lambda;\; Б_{\lambda z}=(1-\lambda_z)V+\lambda_z\Lambda;\\ &W=\Lambda-V;\; Б_{\lambda y}=(1-\lambda_y)V+\lambda_y\Lambda.\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Решая систему уравнений (3) по правилу Крамера, если операторы ползучести (7) коммутативны, получаем соотношения между компонентами деформаций и усилий пространственного элемента:

$$\left.\begin{aligned} K\varepsilon &= \Lambda(T_\varepsilon \varepsilon^* + Ж_\varepsilon \chi_z^* + Г_\varepsilon \chi_y^*) + V(T_\varepsilon \varepsilon_u^* + Ж_\varepsilon \chi_{uz}^* + Г_\varepsilon \chi_{uy}^*);\\ K\chi_z &= \Lambda(T_z \varepsilon^* + Ж_z \chi_z^* + Г_z \chi_y^*) + V(T_z \varepsilon_u^* + Ж_z \chi_{uz}^* + Г_z \chi_{uy}^*);\\ K\chi_y &= \Lambda(T_y \varepsilon^* + Ж_y \chi_z^* + Г_y \chi_y^*) + V(T_y \varepsilon_u^* + Ж_y \chi_{uz}^* + Г_y \chi_{uy}^*), \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

где деформации упругого железобетона от внешней нагрузки и условной усадочной нагрузки равны:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon^* &= \frac{N}{E_0 A};\; \chi_z^* = \frac{M_z}{E_0 I_z};\; \chi_y^* = \frac{M_y}{E_0 I_y};\\ \varepsilon_u^* &= \frac{N_u}{E_0 A};\; \chi_{uz}^* = \frac{M_{uz}}{E_0 I_z};\; \chi_{uy}^* = \frac{M_{uy}}{E_0 I_y}, \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

а обобщенные операторы ползучести имеют вид

$$K = Б_\mu Б_{\lambda z} Б_{\lambda y} - (\lambda_{zy}\lambda_{yz}Б_\mu + e_{sy}\eta_y Б_{\lambda z} + e_{sz}\eta_z Б_{\lambda y})W^2 +$$
$$+ (e_{sz}\eta_y\lambda_{zy} + e_{sy}\eta_z\lambda_{yz})W^3;$$

$$T_\varepsilon = Б_{\lambda z}Б_{\lambda y} - \lambda_{zy}\lambda_{yz}W^2;$$

$$Ж_\varepsilon = (e_{sy}\lambda_{yz}W - e_{sz}Б_{\lambda y})W;\; Г_\varepsilon = (e_{sz}\lambda_{zy}W - e_{sy}Б_{\lambda z})W;$$

$$T_z = (\eta_y\lambda_{zy}W - \eta_z Б_{\lambda y})W; \qquad Ж_z = Б_\mu Б_{\lambda y} - e_{sy}\eta_y W^2;$$

$$Г_\varepsilon = (e_{sy}\lambda_{yz}W - e_{sz}Б_{\lambda y})W;$$

$$T_y = (\eta_z\lambda_{yz}W - \eta_y Б_{\lambda z})W; \quad Ж_y = (\eta_y e_{sz}W - \lambda_{yz}Б_\mu)W;$$

$$Г_y = Б_\mu Б_{\lambda z} - e_{sz}\eta_z W^2. \quad (10)$$

Для определения нормальных напряжений в бетоне и арматуре используем ранее полученные соотношения напряжений. Умножив обе части этих соотношений на оператор ползучести K и выполнив подстановку выражений (8), получим

$$K\Lambda\sigma_в = V(\sigma_{вp} + \sigma_{вu} - K\sigma_u);\quad K\sigma_e = \sigma_{ep} + \sigma_{eu} \quad (11)$$

при

$$\sigma_{вp} = E_0\Lambda(H_{в\varepsilon}\varepsilon^* + H_{вz}\chi_z^* + H_{вy}\chi_y^*);$$

$$\sigma_{ep} = E_e\Lambda(H_{e\varepsilon}\varepsilon^* + H_{ez}\chi_z^* + H_{ey}\chi_y^*);$$

$$\sigma_{вu} = E_0 V(H_{в\varepsilon}\varepsilon_u^* + H_{вz}\chi_{uz}^* + H_{вy}\chi_{uy}^*);$$

$$\sigma_{eu} = E_e V(H_{e\varepsilon}\varepsilon_u^* + H_{ez}\chi_{uz}^* + H_{ey}\chi_{uy}^*)\,; \quad \sigma_u = E_0\varepsilon_u\,, \tag{12}$$

где

$$H_{в\varepsilon} = T_\varepsilon + yT_z + zT_y\,; \quad H_{e\varepsilon} = T_\varepsilon + y_eT_z + z_eT_y\,; \quad H_{вz} = Ж_\varepsilon + yЖ_z + zЖ_y\,;$$

$$H_{ez} = Ж_\varepsilon + y_eЖ_z + z_eЖ_y\,; \quad H_{вy} = Г_\varepsilon + yГ_z + zГ_y\,;$$

$$H_{ey} = Г_\varepsilon + y_eГ_z + z_eГ_y\,. \tag{13}$$

Касательные напряжения в бетоне при сложном изгибе определим на основе концепции Д.И.Журавского, учитывая при этом, что приращения нормальных напряжений также распределяется между бетоном и арматурой:

$$\left.\begin{aligned} \tau_{вy} &= \frac{1}{в_y}\left[\int\limits_{A_{вy}} \frac{\partial\sigma_в}{\partial x} dA_{вy} + \sum_{e=1}^{s_y} \frac{\partial\sigma_e}{\partial x} A_{e\bar{y}}\right]; \\ \tau_{вz} &= \frac{1}{в_z}\left[\int\limits_{A_{вz}} \frac{\partial\sigma_в}{\partial x} dA_{вz} + \sum_{e=1}^{s_z} \frac{\partial\sigma_e}{\partial x} A_{e\bar{z}}\right], \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

где s_y и s_z – количество стержней арматуры, находящихся соответственно в областях $A_{вy}$ и $A_{вz}$, т.е. в областях за пределами слоя сечения с координатами y или z; $A_{e\bar{y}}$ и $A_{e\bar{z}}$ – площади сечения e-х арматурных стержней, расположенных соответственно в областях $A_{вy}$ и $A_{вz}$; $в_y$ и $в_z$ – ширина приведенного сечения по осям y и z соответственно.

Умножив выражения (14) на операторы ползучести Λ и K, заменяя в них нормальные напряжения в бетоне и арматуре при помощи выражения (11) при учете (9), принимая во внимание, что производная по x от усадочных деформаций равна нулю и имея в виду известные соотношения $Q_y = \dfrac{\partial M_z}{\partial x}$; $Q_z = \dfrac{\partial M_y}{\partial x}$, получим

$$\left.\begin{aligned} K\tau_{вy} &= \frac{1}{в_y}\left[\frac{H_{\varepsilon y}}{A}\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{H_{zy}Q_y}{I_z} + \frac{H_{yy}Q_z}{I_y}\right]; \\ K\tau_{вz} &= \frac{1}{в_z}\left[\frac{H_{\varepsilon z}}{A}\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{H_{zz}Q_y}{I_z} + \frac{H_{yz}Q_z}{I_y}\right], \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

где

$$H_{\varepsilon y} = Б_\varepsilon T_\varepsilon + Б_z T_z + Б_y T_y;\quad H_{\varepsilon z} = D_\varepsilon T_\varepsilon + D_z T_z + D_y T_y;$$

$$H_{zy} = Б_\varepsilon Ж_\varepsilon + Б_z Ж_z + Б_y Ж_y;\quad H_{zz} = D_\varepsilon Ж_\varepsilon + D_z Ж_z + D_y Ж_y;$$

$$H_{yy} = Б_\varepsilon Г_\varepsilon + Б_z Г_z + Б_y Г_y;\quad H_{yz} = D_\varepsilon Г_\varepsilon + D_z Г_z + D_y Г_y;$$

$$Б_\varepsilon = A_{в y} V + A_{s\bar{y}}\Lambda;\quad D_\varepsilon = A_{в z} V + A_{s\bar{z}}\Lambda;\quad Б_z = S_{в\bar{z}} V + S_{s\bar{z}}\Lambda;$$

$$D_z = \bar{S}_{в z} V + \bar{S}_{s z}\Lambda;\quad Б_y = S_{в\bar{y}} V + S_{s\bar{y}}\Lambda;\quad D_y = \bar{S}_{в y} V + \bar{S}_{s y}\Lambda \tag{16}$$

при

$$A_{в y} = \int\limits_{A_{в y}} dA_{в y};\quad A_{в z} = \int\limits_{A_{в z}} dA_{в z};\quad A_{s\bar{y}} = \sum_{e=1}^{s\bar{y}} \frac{E_e}{E_0} A_{e\bar{y}};$$

$$A_{s\bar{z}} = \sum_{e=1}^{s\bar{z}} \frac{E_e}{E_0} A_{e\bar{z}};\quad S_{в\bar{z}} = \int\limits_{A_{в y}} y\,dA_{в y};\quad \bar{S}_{в z} = \int\limits_{A_{в z}} y\,dA_{в z};$$

$$S_{s\bar{z}} = \sum_{e=1}^{s\bar{y}} \frac{E_e}{E_0} y_e A_{e\bar{y}};\quad \bar{S}_{s z} = \sum_{e=1}^{s\bar{z}} \frac{E_e}{E_0} y_e A_{e\bar{z}};\quad S_{в\bar{y}} = \int\limits_{A_{в y}} z\,dA_{в y};$$

$$\bar{S}_{в y} = \int\limits_{A_{в z}} z\,dA_{в z};\ S_{s\bar{y}} = \sum_{e=1}^{s\bar{y}} \frac{E_e}{E_0} z_e A_{e\bar{y}};\quad \bar{S}_{s y} = \sum_{e=1}^{s\bar{z}} \frac{E_e}{E_0} z_e A_{e\bar{z}}. \tag{17}$$

Как следует из формул (15), при длительном деформировании касательные напряжения при изгибе зависят не только от поперечных сил, как в обычном упругом расчете по формуле Д.И.Журавского, но и от градиента продольной силы, что может иметь место при расчете наклонных стержней с распределенной нагрузкой, колонн при учете собственного веса, различных конструкций при расчетах на объемные или массовые силы.

При расчете симметрично армированных стержневых пространственных элементов вышеприведенные формулы для напряжений резко упрощаются, так как при $S_{s\,y} = S_{s\,z} = 0$ и $J_{s,\,zy} = J_{s,\,yz} = 0$:

$$\eta_z = \eta_y = 0;\qquad e_{s\,z} = e_{s\,y} = \lambda_{z\,y} = \lambda_{y\,z} = 0;\qquad S_{в\,y} = S_{в\,z} = 0;$$

$M_{и\,y} = M_{и\,z} = 0$. Таким образом, *нормальные напряжения* в арматуре $\sigma_e(t)$ и бетоне $\sigma_в(t)$ пространственного элемента определяются по формулам (11) – (13) при известных изгибающих моментах $M_ф(t)$ и продольной силе $N_ф(t)$.

Касательные напряжения в бетоне $\tau_в(t)$ пространственного элемента определяются по формулам (15) – (17) при известных поперечных $Q_ф(t)$ и продольных $N_ф(t)$ силах.

Данные о текущих нормальных напряжениях в арматуре и бетоне используются для определения потерь предварительного напряжения в арматуре, которые в соответствии с теорией собственных напряжений проф. Е.А.Яценко [2] определяются по формуле

$$\sigma_{loss2e}(t) = \sigma_e(t) - \alpha_e(t) \cdot \sigma_в(x_e, t) \qquad (x \equiv y, z). \qquad (18)$$

Здесь $\sigma_e(t)$ и $\sigma_в(x_e, t)$ – суммы приращений напряжений в арматуре и бетоне, вызванных действием усилий предварительного напряжения арматуры, усадки (набухания) бетона и длительной внешней нагрузкой; $\alpha_e(t) = \dfrac{E_e}{E_в(x_e, t)}$ – отношение модулей упругости арматуры к бетону в расчетный момент времени t.

Равнодействующая собственных напряжений $P(t)$ и эксцентриситеты ее приложения $e_{0p,y}(t)$ и $e_{0p,z}(t)$ определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned}
P(t) &= \sum_{e=1}^{s}[\sigma_{con1} + \sigma_{loss2e}(t)]A_e;\\
e_{0p,y}(t) &= \frac{\sum_{e=1}^{s}[\sigma_{con1} + \sigma_{loss2e}(t)]A_e y_e}{P(t)};\\
e_{0p,z}(t) &= \frac{\sum_{e=1}^{s}[\sigma_{con1} + \sigma_{loss2e}(t)]A_e z_e}{P(t)}.
\end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

По формулам (19) осуществляется переход от расчетов текущих значений внутренних усилий и напряжений стержневых железобетонных систем с учетом пространственной работы, деформаций продольного изгиба и длительных процессов к расчетным формулам СНиП [3].

1.Слободянюк С.А. Длительный продольный изгиб железобетонных стержней при перемещениях опор // Современные проблемы строительства. – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, ООО "Лебедь", 1999. – С. 40-46.

2.Яценко Е.А. Методы расчета железобетонных конструкций на длительное воздействие с учетом ползучести бетона: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. – М.,1989. – 364 с.

3.СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.

Получено 16.05.2002

УДК 004.89 : 692.4

С.Н.ТАРАКАНОВСКИЙ, канд. экон. наук
Одесский государственный экономический университет
Г.П.КОЛОМИЙЧУК
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

МАКЕТ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ

Рассматривается возможность создания прикладной экспертной системы, позволяющей реализовать методику получения многомерной оценки конструкций, полученной на основе анализа конструктивных решений и статистического обобщения технико-экономических показателей большепролетных пространственных покрытий.

Существующая практика проектирования и строительства показывает, что в большинстве сооружений фактический расход материалов и сметная стоимость отличаются от планируемых, различие увеличивается от стадии к стадии, от начала строительства к его завершению. В связи с эти очень важно более четко и правильно определять технико-экономические показатели объектов строительства на ранних стадиях проектирования. Чтобы отыскать лучший вариант проекта, недостаточно использовать традиционные методы, основанные на интуиции и опыте проектировщиков (знаниях экспертов), необходимо находить научно-обоснованные методы проектирования, выбора рационального варианта конструкции и реализовывать их в экспертных системах, применяемых в сфере проектирования объектов строительства.

К решению этих проблем существует два методических подхода. Первый характеризуется тем, что сведения о конструкциях и соответствующие технико-экономические показатели сводятся в каталогах, из которых проектировщику предлагается выбирать решение. При этом опускается сравнительный анализ, как родственных конструкций, так и систем построенных на различных структурных принципах. При втором подходе информация об объектах обобщается и формализуется в виде графических моделей, которые дают возможность сравнивать разные системы и уменьшают субъективизм оценки. Наглядность и строгость графического моделирования вытекающего из математического моделирования, делают этот подход более убедительным. Но в